UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER — FACULTÉ DE MÉDECINE

De la Rupture sans Arcs

DES

CIRCUITS OSCILLANTS

THÈSE

POUR LE DOCTORAT EN MÉDECINE

Présentée et soutenue publiquement en novembre 1920

PAR

E. LAURENS

MONTPELLIER
IMPRIMERIE DE L'"ÉCONOMISTE MÉRIDIONAL"
9, Boulevard du Jeu-de-Paume, 9
Téléphone 11-31

1920

De la Rupture sans Arcs

DES

CIRCUITS OSCILLANTS

UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER — FACULTÉ DE MÉDECINE

De la Rupture sans Arcs

DES

CIRCUITS OSCILLANTS

THÈSE

POUR LE DOCTORAT EN MÉDECINE

Présentée et soutenue publiquement en novembre 1920

PAR

E. LAURENS

MONTPELLIER
IMPRIMERIE DE L'"ÉCONOMISTE MÉRIDIONAL"
9, Boulevard du Jeu-de-Paume, 9
Téléphone 11-31

1920

PERSONNEL DE LA FACULTÉ

Administration

MM. N..... *Doyen.*
FORGUE, O. ✻..... *Assesseur.*
N..... *Secrétaire.*

Professeurs

Clinique chirurgicale	MM.	TEDENAT, O. ✻.
Clinique des maladies mentales et nerveuses.		MAIRET, ✻.
Physique médicale		IMBERT, ✻.
Botanique et histoire naturelle médicales		GRANEL.
Clinique chirurgicale		FORGUE, O. ✻.
Clinique ophtalmologique		TRUC, O. ✻.
Physiologie		HEDON, ✻.
Histologie		VIALLETON.
Clinique médicale		DUCAMP, ✻.
Anatomie		GILIS, ✻.
Clinique chir. infantile et orthopédie		ESTOR.
Clinique des maladies des enfants		BAUMEL, ✻.
Pathologie et thérapeutique générales		BOSC.
Hygiène		BERTIN-SANS (H.).
Clinique obstétricale		VALLOIS.
Thérapeutique et matière médicale		VIRES, ✻.
Anatomie pathologique		MASSABUAU, ✻, ✙.
Chimie biologique et médicale		DERRIEN, ✙.
Microbiologie		LISBONNE.
Pathologie interne		N...
Clinique médicale		VEDEL.
Médecine légale et toxicologie		N...
Clinique gynécologique		DE ROUVILLE.
Clinique d'oto-rhino		MOURET.
Doyens honoraires	MM.	VIALLETON, MAIRET.
Professeur honoraire		E. BERTIN-SANS, ✻.
Secrétaires honoraires		GOT, IZARD.

Chargés de Cours complémentaires

Clinique ann. des mal. syphil. et cutanées	MM.	N...
Clinique des maladies des voies urinaires		JEANBRAU, O. ✻, ✙, a. l. (ch. de c.)
Médecine opératoire		SOUBEYRAN, ✻, ✙, a. l. (ch. de c.).
Pathologie externe		ETIENNE, agrégé (ch. de c.).
Clinique annexe des maladies des vieillards		EUZIÈRE, agrégé (ch. de c.).
Accouchements		P. DELMAS, agrégé (ch. de c.).
Matière médicale		N...
Stomatologie		WATON, ✻, ✙, doct. (ch. de c.).

Agrégés en exercice

MM. GALAVIELLE.	MM. CABANNES.	MM. ETIENNE.
GRYNFELTT, ✻.	P. DELMAS.	MESTREZAT.
LEENHARDT.	EUZIÈRE.	LAPEYRE.
GAUSSEL, ✻, ✙.	J. DELMAS, ✙.	MARGAROT.
RICHE.	RIMBAUD, ✻.	STROHL.

Examinateurs de la thèse

MM. IMBERT, professeur, *président.* MM. DUCAP, professeur.
HEDON, professeur. STROHL, agrégé.

La Faculté de Médecine de Montpellier déclare que les opinions émises dans les dissertations qui sont présentées doivent être considérées comme propres à leur auteur et qu'elle n'entend leur donner ni approbation, ni improbation.

De la Rupture sans Arcs

DES

CIRCUITS OSCILLANTS

Parmi les dispositifs que l'art médical a empruntés à l'électrotechnique, la « bobine d'induction » est certainement un des plus répandus.

Nous le trouvons dans l'arsenal de l'électrothérapeutique sous les formes et les dimensions les plus variées, depuis les petits appareils faradiques jusqu'aux puissants transformateurs pour la génération des rayons X et des oscillations à haute fréquence.

Il semble donc que toute contribution, si modeste soit-elle, à l'étude ou à l'amélioration d'un instrument d'un usage aussi courant puisse présenter quelque intérêt pour le médecin.

Nous n'avons pas la prétention d'apporter des clartés nouvelles à la théorie de la bobine d'induction, si magistralement exposée par ARMAGNAT, après les travaux mathématiques de COLLEY; nous voudrions seulement déterminer, au point de vue pratique, les conditions optima d'un phénomène qui est à la base du fonctionnement de cet appareil, c'est-à-dire la rupture brusque du circuit primaire, condition nécessaire du bon rendement de la bobine.

Nous examinerons dans ce but la question à un point de vue plus général, en étudiant les phénomènes d'ouverture dans des circuits sans self ni capacité, cherchant à mettre en lumière l'influence propre du métal des électrodes dans les différences de potentiel au contact, origine des phénomènes calorifiques et ioniques qui conditionnent l'amorçage des arcs de rupture.

Nous apporterons dans cette partie de notre développement quelques résultats personnels pour déterminer le choix de la matière des électrodes, suivant les intensités et les voltages que l'on désire couper sans arc. Puis, passant à l'étude des circuits avec self et capacité, nous tâcherons d'indiquer quelles sont les constantes électriques du circuit les plus favorables à une rupture rapide, avec le minimum possible d'oscillations, et nous verrons si le condensateur de FIZEAU n'est pas susceptible de donner des résultats plus avantageux en en modifiant la disposition usuelle suivant la suggestion des méthodes employées en radiotélégraphie pour l'étouffement des étincelles dans « l'impulsion par choc ».

Enfin, suivant les récents progrès faits dans l'utilisation des arcs comme générateurs d'onde, nous essaierons de déterminer si l'arc ne pourrait pas représenter l'interrupteur le meilleur et le plus souple pour les bobines d'induction.

Des phénomènes accompagnant la rupture d'un circuit électrique.

Si, dans un circuit électrique aux extrémités duquel un générateur maintient une différence constante de potentiel, nous introduisons un interrupteur mécanique,

nous verrons, lorsque ce dernier entrera en action, une série de phénomènes se reproduire périodiquement au moment du contact, puis de la séparation des deux électrodes.

Ces phénomènes seront à peu de chose près les mêmes, que la rupture s'effectue par glissements entre lame et balais comme dans un interrupteur rotatif ou qu'elle se produise par basculement et arrachement comme dans un vibreur.

Nous ne nous occuperons ici que des phénomènes d'ouverture, de beaucoup les plus importants au point de vue pratique, car ils donnent naissance à l'arc de rupture. Nous étudierons dans ce but le cas géométriquement plus simple de l'ouverture d'un circuit par glissement des électrodes, car nous pourrons en suivre plus facilement l'évolution.

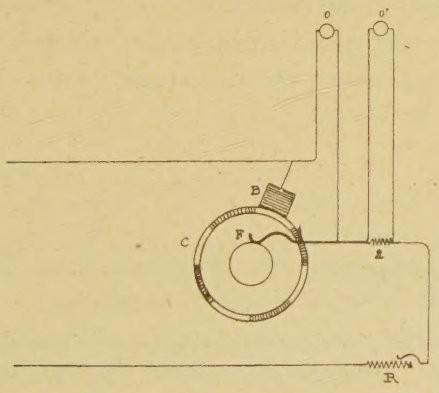


FIG. 1.

Soit un cylindre métallique C *(fig. 1)* dont la surface est composée de lames alternativement isolantes et conductrices. B un balai frottant sur cette surface et relié

à un des pôles du générateur; F frotteur appuyant sur une bague communiquant avec les lames conductrices et relié à l'autre pôle du générateur; OO' les deux équipages d'un oscillographe Blondel permettant de prendre par O le tracé des différences de potentiel entre B et F (ou différence de potentiel au contact entre lame et balai), en O' la courbe d'intensité de courant; R résistance intercalée de l'équipage O'R rheostat [1].

Si nous examinons, au point de vue électrique, le contact du balai B et d'une lame active, alors qu'il n'y a plus interposition partielle d'isolant sous le balai, nous voyons que ce contact présente une certaine résistance (variable avec la nature des électrodes). Minima au moment où le balai porte entièrement sur la lame, cette résistance variera au fur et à mesure du glissement de la lame sous le balai d'une façon inversement proportionnelle à la surface de contact.

Pour une self induction nulle, la résistance du circuit comprend une partie fixe R_1 et une partie variable du contact de la forme :

$$R = \rho \frac{T}{t}$$

t étant le temps qui reste avant la coupure T, et ρ la résistance du balai sur le secteur métallique.

Le courant (en supposant la résistance spécifique indépendante de la densité de courant) décroîtra suivant une courbe dont on peut déterminer les éléments : en effet, si I est l'intensité, nous avons :

1. Dispositif d'Arnold et Lacour. *The commutation of direct and alternating currents.* (Congrès de Saint-Louis, tome I.)

$$I = \frac{E}{R + R_1}$$

En appelant Io la valeur que prendrait le courant pour une résistance de contact nulle et en remplaçant R par sa valeur, on a :

$$I = I_0 \frac{R_1 t}{R_1 t + \rho T} = I_0 \frac{1}{1 + \frac{\rho}{R_1} \frac{T}{t}}$$

Cette décroissance se produit jusqu'au moment de la rupture où, la résistance devenant infinie, le courant s'annule, à condition qu'il n'y ait pas d'arc.

Si un arc se forme (nous verrons plus tard dans quel cas), le courant n'est pas entièrement coupé, il continue à passer une intensité

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2}$$

la résistance au contact R ayant été remplacée par R_2 résistance de l'arc qui varie dans le même sens que l'écartement des électrodes, jusqu'à ce que l'arc soit coupé.

Les deux tracés de la figure 2 montrent l'allure de la rupture d'un circuit dont la self et la capacité sont négligeables, le tracé supérieur correspond à l'inscription donnée par l'équipage O (courbe de potentiel), le tracé inférieur à celle de l'équipage O' [intensité] *(fig. 1)*. La rupture géométrique coïncide ici avec la rupture électrique, il n'y a pas d'arc.

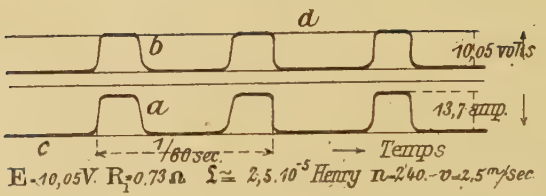


FIG. 2 [1].

Si on introduit une self induction notable dans le circuit, les conditions sont complètement changées : la différence de potentiel à la coupure s'élève bien au-dessus de la tension du générateur, il y a déformation des courbes comme l'indique la figure 3.

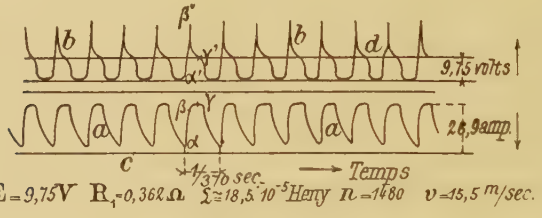


FIG. 3 [1].

A chaque rupture, un arc se produit prolongeant le temps T et engendrant des tensions de la forme $\alpha' \beta' \gamma'$ qui dépendent de la valeur de la self introduite et de la vitesse de l'interrupteur. Ces tensions masquent en partie les effets de la résistance de contact R; si donc nous voulons étudier séparément ces phénomènes de contact, il convient de le faire sur des circuits simplifiés sans self ni capacité. Nous pourrons ainsi nous rendre compte de sa valeur et des lois de sa variation pour différents corps, différentes pressions et vitesse.

1. D'après ARNOLD et LACOUR. (Comptes rendus du Congrès de Saint-Louis.)

De nombreux auteurs ont publié des travaux sur la question ; il ne semble pas qu'elle ait été épuisée.

Recherches expérimentales sur la résistance des contacts.

Les premières recherches datent de 1895 et sont dues à Cox et Buch, de New-York [1] ; comme la plupart des travaux faits à ce sujet, elles avaient pour but l'étude de la « commutation » dans les dynamos à courant continu, c'est-à-dire l'ensemble des phénomènes qui se produisent au collecteur d'une dynamo pendant le contact simultané, sous un même balai, de deux lames de collecteur auxquelles aboutissent les extrémités d'une bobine [2]. Dans la commutation, les résistances de contact jouant un rôle très important et le phénomène rappelant beaucoup, par certains côtés, l'ouverture et la fermeture d'un circuit primaire de bobine d'induction, nous pourrons bénéficier d'un certain nombre de remarques faites à ce sujet. Cox et Buch ont étudié la résistance de contact de balais de cuivre et de charbon sur poulie de fonte et sur commutateur de cuivre sec et huilé; les courbes données ne peuvent être d'une grande utilité, les expérimentateurs n'ayant pas indiqué les valeurs de la densité de courant avec laquelle ils ont opéré, variante des plus

1. *Relations entre la pression, la résistance électrique et le frottement dans le contact de dynamos. (Eclairage électrique,* 30 novembre 1895.)

2. *Recherches expérimentales et théoriques sur la commutation dans les dynamos à courant continu,* par A. Manduit. (Dunod et Pinat.)

importantes à connaître. Néanmoins, ils sont arrivés à deux conclusions intéressantes :

1° La résistance de contact n'est pas inversement proportionnelle à la pression; au delà d'une certaine limite, une grande augmentation de pression ne détermine qu'une faible diminution de résistance;

2° La résistance de contact du charbon est beaucoup plus élevée que celle du cuivre.

Nous trouvons ensuite les recherches du professeur ARNOLD, à Karlsruhe, en 1899[1].

Il arrive aux conséquences générales suivantes :

1° Pour le contact charbon-cuivre, la résistance de contact décroît rapidement, surtout aux grandes vitesses périphériques, dès que la densité du courant augmente;

2° A densité de courant constante, la résistance croît d'abord avec le nombre de tours, passe par un maximum et décroît ensuite.

Pour le contact cuivre-cuivre, la variation de résistance avec la densité de courant est de même sens, mais d'une amplitude moindre.

Pour des densités de 5 à 8 ampères par cm^2 et des vitesses périphériques de 16 à 18 m/sec, les résistances de contact oscillent entre 0,25 et 0,15 ohm/cm^2 pour le contact charbon-cuivre, et 0,015 et 0,005 Ω /cm^2 pour le contact cuivre-cuivre.

P. BOURGUIGNON, au Laboratoire central d'Electricité de Paris, en 1903[2], à des vitesses de $3^m 30$ sec et des pressions de 320 g/cm^2, constate que la chute de

1. *Der Kontakt Widerstand von Kohlen und Kupher Bürsten und die Temperature hohung eines Kollectors. (Electrotechnische Zeitschrifts,* janvier 1899.)

2. *Essais sur la résistance des balais en charbon.* Communication à la Société internationale des Electriciens (7 janvier 1903).

tension augmente avec la densité de courant, mais sensiblement moins vite que cette dernière; il arrive aux chiffres suivants pour deux balais de charbon en série :

Densité en A/cm²	Chute totale de tension en volt pour les deux balais.
0 83	0 32
4 15	1 10
6 4	1 47
13 1	2 32
16 1	2 67

Il arrive à cette conclusion que si ε est la différence de potentiel au contact et I l'intensité du courant, la loi de variation est $\varepsilon = a + b_o I$, a et b_o étant deux constantes.

E. SIEDECK, en 1906 [1], a émis l'opinion que les lois de la tension de passage s'expliquent aisément en supposant que le contact se fasse par de petits arcs dont le nombre augmente avec la densité de courant, et il note que la tension de passage était plus grande pour le balai négatif d'une génératrice, c'est-à-dire lorsque le courant va du charbon au cuivre, que pour le balai positif, courant du cuivre au charbon.

En 1908, un des élèves d'ARNOLD, l'ingénieur J. LISKA, a repris les recherches d'ARNOLD et LACOUR, dont nous avons déjà parlé, avec un commutateur tournant analogue, mais opérant exclusivement sans self induction, avec des tensions variables pour les deux sens de courant et des balais de différentes sortes. Les résultats obtenus sont

1. *Sur le fonctionnement des balais en charbon,* par E. SIEDECK. *(Electrotechnische Zeitschrifts,* novembre 1906.) — J. LISKA, *Electrotechnische Zeitschrifts,* janvier 1909, et MAUDUIT.

des plus curieux. Pour une tension de 20 volts, un courant de 6 Amp., une vitesse périphérique de 7,85 m. s. et un balai Z de la Société *Le Carbone* de $15^{m}/_{m} x 20^{m}/_{m}$ à l'anode, il y a de très faibles étincelles. A la coupure, la tension s'élève d'abord jusqu'à une valeur $\varepsilon f = 14{,}3$ volts et s'y maintient pendant toute l'étincelle (avant de prendre la valeur E de la batterie), le courant ayant à ce moment une certaine valeur *if*. Pour des courants maxima I, variables de 2 à 20 A et des vitesses jusqu'à 15,5 m. s., on obtenait la même valeur εf et une valeur de *if*, toujours égale à 0,34 I. Pour des tensions de batterie inférieures à 14 volts, il n'y avait plus d'étincelles; pour des tensions de 30, 40 et 60 volts, la même valeur $\varepsilon f = 14{,}3$ volts se maintenait pendant l'étincelle, mais le rapport $\frac{if}{I}$ variait avec la tension suivant la loi :

$$if = \frac{E - \varepsilon f}{E - \varepsilon_1} I$$

ε_1 étant la tension de passage ou différence de potentiel au contact quand le balai était entièrement sur une lame active.

Les mêmes phénomènes un peu moins nets se produisaient pour le balai cathode avec εf différent.

L'auteur a dressé le tableau suivant des valeurs de la tension critique εf pour différents balais :

	Anode	Cathode
Carbone Z	14 5	22 5
Morganite	14 5	16
Cuivre charbon, Endruweit	14 5	21
Endruweit métallique	14	14
Ringsdorff métal	15 3	12 5

tableau qui montre que le phénomène dépend surtout de la cathode lorsqu'on étudie un arc déjà amorcé. Nous verrons au contraire plus loin que les phénomènes de contact, tant qu'un arc n'est pas amorcé, dépendent presque exclusivement de l'anode.

Ces essais sont très intéressants, mais ils sont localisés à un certain nombre de balais employés dans l'industrie, ces balais étant composés de matières fort différentes souvent unies par des liants; on ne peut rien en déduire pour les autres corps.

L'enseignement qu'on peut retirer des travaux que nous venons d'examiner, c'est que :

1° La différence de potentiel au contact a une valeur différente suivant les corps en présence;

2° Qu'elle n'est pas égale lorsque les corps sont employés comme cathode et comme anode;

3° La résistance d'un contact est à peu près proportionnelle à la surface;

4° La résistance d'un contact n'est pas inversement proportionnelle à la pression;

5° La résistance d'un contact charbon n'augmente pas proportionnellement au courant qui le traverse; elle augmente cependant, mais moins vite que ne croît le courant.

Si on appelle ε la différence de potentiel au contact et I l'intensité de courant, la loi de variation de la différence de potentiel au contact peut être mise sous la forme $\varepsilon = a + b_0 I$, a et b_0 étant deux constantes.

La courbe *(fig. 4)* donne quelques valeurs de ε pour différents balais en charbon d'après KAHN [1].

1. *La résistance de contact des balais de charbon.* Max KAHN, Stuttgart, 1902.

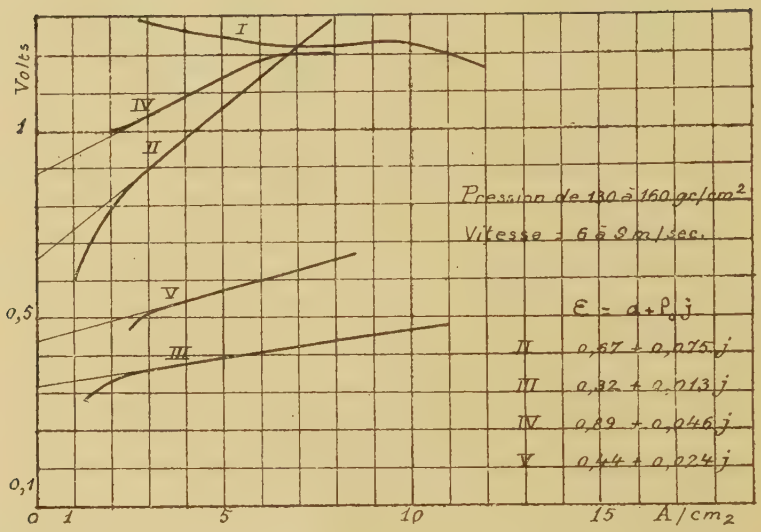
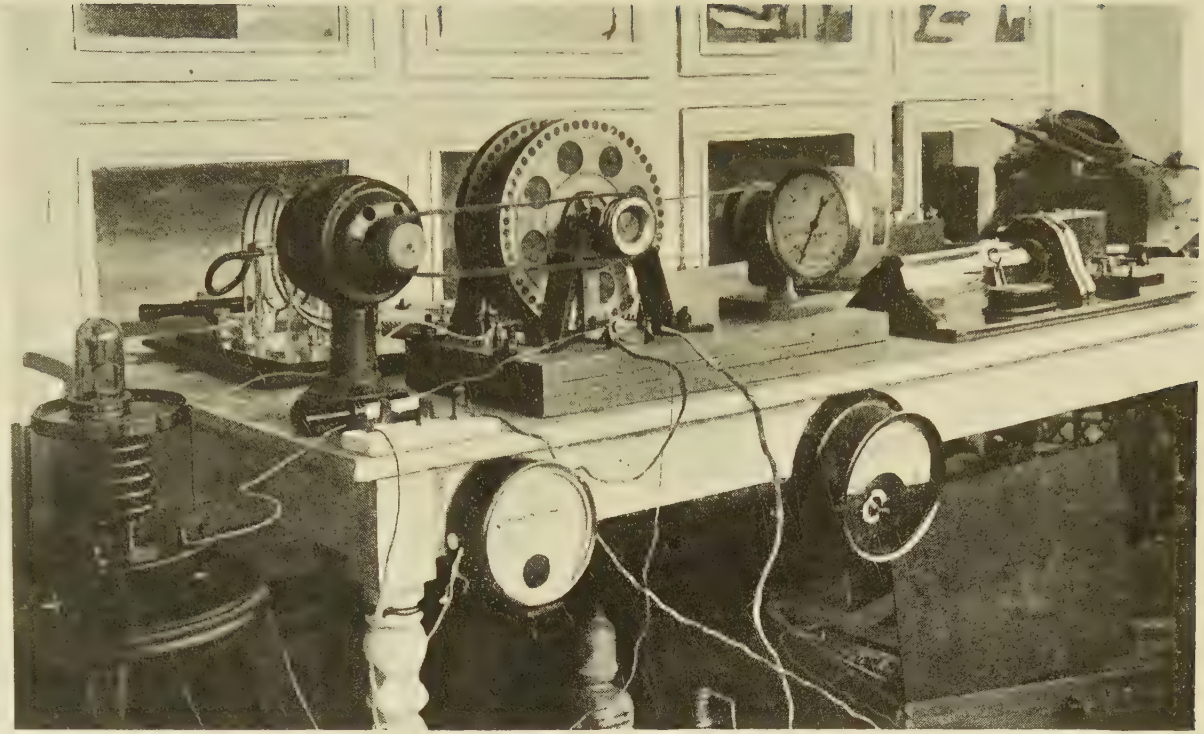


FIG. 4.

Il nous a paru qu'il y aurait intérêt à compléter ces recherches sur les résistances des contacts en les étendant à une série de métaux usuels.

De plus, nous avons pensé faire œuvre utile en établissant pour tous ces corps les valeurs maxima en ampères *Im*, que l'on peut couper sans arcs pour une tension constante *Em*, le produit *ImEm* représentant la puissance en watts qui peut être coupée. Nous avons déterminé *ImEm* pour les différentes valeurs de *Em* entre 0 et 200 volts et pour des vitesses de rupture allant jusqu'à 50 m/s. Pour faire des essais dans des conditions constamment comparables, nous avons naturellement été amenés à opérer sur un circuit aussi dépourvu que possible de self et de capacité.

FIG. 5.



Galvanomètre Moteur Interrupteur rotatif Tachymètre Rhéostat sans self

Ampèremètre Voltmètre

Dispositif expérimental pour effectuer ces recherches.

Nous avons fait construire un contact tournant très robuste, composé de deux plateaux circulaires de fibre isolante de 27 c. de diamètre et 2 c. 5 d'épaisseur, serrés chacun entre deux joues en laiton de 4 m/m d'épaisseur et montés sur un arbre d'acier de 25 m/m au moyen de manchons clavetés sur l'arbre et de brides boulonnées sur les plateaux. L'arbre repose sur deux paliers à billes montés sur des chaises solidement fixées au socle et porte en haut une poulie permettant l'entraînement par un moteur électrique. Les joues ont été évidées au centre, de façon à laisser un intervalle d'isolement de 5 m/m entre elles et le manchon.

De plus, on a percé de part en part chaque plateau de fibre, monté avec ses joues, d'une série de trous de 12 m/m, dont les centres ont été disposés à distances égales sur une circonférence tracée à 1 centimètre du bord externe du plateau; dans ces trous ont été emmanchés, à la presse, des cylindres de fibre d'un diamètre légèrement supérieur. Les cylindres de fibre ont été rasés à l'affleurement du laiton.

On a ensuite dressé au tour les faces des plateaux montés sur leur arbre pour obtenir des surfaces bien perpendiculaires à l'axe de rotation. Chaque face de plateau porte deux balais : un frottant sur la circonférence portant les cylindres isolants permettant la fermeture et l'ouverture du courant au passage des bandelettes métalliques; l'autre appuyant sur une partie pleine de la joue de laiton et formant contact permanent; un jeu de con-

ducteurs souples et de vis molletées permet tous les couplages possibles des quatre faces de plateaux et des huit balais.

Ce dispositif, à la vérité un peu trop compliqué pour la présente étude, avait été réalisé pour servir à l'étude de la charge et de la décharge rapides des condensateurs dans des circuits variés; sa complexité nous a toutefois permis, dans ces recherches, de faire des essais avec plusieurs coupures en série et de voir que leurs effets s'additionnaient.

Balais. — Il était nécessaire, pour nos essais, que les frotteurs remplissent un certain nombre de conditions assez difficiles à obtenir pratiquement; ils devaient :

1° Réaliser un contact aussi homogène que possible;

2° Présenter le minimum de vibration;

3° La pression devait pouvoir être mesurée facilement;

4° Les différents corps à étudier devaient s'y adapter sans difficultés.

Après plusieurs essais, nous nous sommes arrêté au modèle ci-dessous, qui nous a donné des résultats satisfaisants, à condition de faire des essais aussi courts que possible pour ne pas être gênés par l'échauffement du frotteur, surtout aux grandes vitesses, et ne pas dépasser des valeurs d'intensité de 15 ampères.

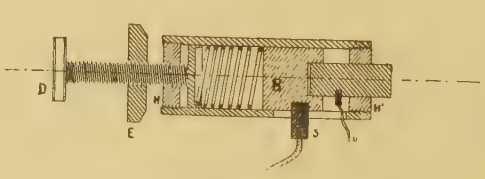


Fig. 6.

Dans un cylindre en bronze A *(fig. 6)*, fermé à ses deux extrémités par deux disques H et H', coulisse à frottement doux un piston B du même métal; sur sa face antérieure, ce piston porte un trou rectangulaire de $5^{m}/_{m}$ de hauteur $\times$ 5 de largeur, dans lequel vient s'encastrer et se souder une lame *c* de mêmes dimensions et de 2 centimètres de longueur du métal à étudier; cette lame traverse à frottement doux le disque H' dans une fente qui lui sert de guide et évite les vibrations.

Sur la face postérieure de B vient s'appliquer un ressort à boudin R, que l'on peut comprimer à volonté au moyen d'une vis D sortant du disque D'; un écrou E fixe la vis à la position demandée.

La face inférieure du cylindre A porte une fente de $3^{m}/_{m}$ de large dans laquelle vient coulisser un ergot porté par le piston. C'est sur cet ergot que vient se fixer par un conducteur souple l'arrivée du courant. La même fente laisse passer un petit conducteur souple en argent *u* soudé à la lame *c*.

Ce conducteur servira dans les mesures à prendre directement le potentiel de *c* le plus près possible du contact.

Le cylindre A porte à son extrémité antérieure une partie filetée K, qui vient se visser dans le porte-balais, où elle est maintenue en position par un écrou.

Nous n'avons utilisé d'abord qu'une face du plateau de l'interrupteur pour la réalisation des expériences.

On a disposé le balai que nous venons de décrire dans son porte-balais, de façon à ce que la lame C de substance à étudier vînt frotter exactement sur le centre des petits cylindres isolants.

Dans ces conditions, le courant est coupé cinquante fois par tour entre la lame à étudier formant anode et le disque de laiton de l'interrupteur, qui est relié au pôle

négatif par un balai ordinaire en toile argentée F *(fig. 7)*, disposé de façon à frotter sur la partie pleine de la joue de laiton.

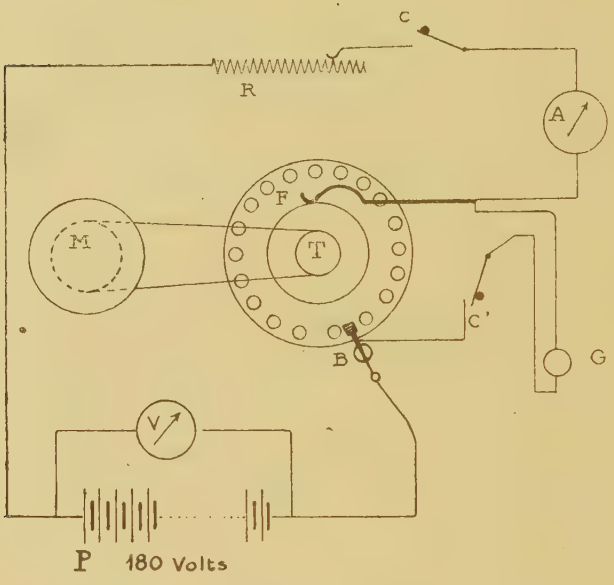


FIG. 7.

Une batterie de quatre-vingt-dix accumulateurs P fournit la force électromotrice; un voltmètre V mesure sa tension; le pôle + est joint directement au balai interrupteur B.

Sur le pôle — sont mis en série une clef à couteau C, une résistance réglable sans self R, un ampèremètre thermique A et enfin le deuxième balai F.

Une dérivation sur chaque balai permet de mesurer les différences de potentiel de contact au moyen du galvanomètre G.

Lorsqu'on a choisi, grâce au coupleur de la batterie d'accumulateurs, le voltage que l'on désire utiliser, avec le corps employé comme frotteur, on met en route le moteur de l'interrupteur, on note le chiffre marqué par l'aiguille du tachymètre donnant le nombre de tours du plateau à la seconde et, par conséquent, la vitesse de rupture. On introduit la résistance maxima, puis on ferme le circuit. Ensuite, avec le curseur, on diminue peu à peu la résistance jusqu'à ce que l'on voie apparaître des arcs au balai de rupture; on revient alors un peu en arrière et on note exactement l'indication de l'ampèremètre lorsque les arcs disparaissent. On coupe le circuit, on arrête le moteur, on tourne à la main le plateau jusqu'à ce que la lame C du balai appuie sur un contact et on ferme de nouveau la clef à couteau. L'ampèremètre donne une nouvelle indication qui nous renseigne sur la valeur instantanée approximative du courant au moment des ruptures; on mesure à ce moment avec le galvanomètre la valeur de la différence de potentiel au contact pour l'intensité de courant indiquée.

Nous avons utilisé, pour effectuer les mesures de différences de potentiel au contact, un galvanomètre Hartmann et Braun à aimant fixe et cadre mobile.

Pour simplifier les opérations, après avoir étalonné le galvanomètre avec un élément Clarke, nous en avons modifié la sensibilité grâce à un shunt en manganine, de façon à ce qu'à 0.002 volts se produise une déviation de 1 degré sur l'échelle. Il suffisait alors d'une lecture pour obtenir en millivolts la différence de potentiel au contact. La méthode employée, quoique bien inférieure à d'autres comme approximation, était d'une précision largement suffisante pour apprécier des valeurs influencées par les moindres variations dans les conditions d'expé-

rience et souvent sans cause apparente. Il était donc nécessaire de faire de nombreuses lectures et de prendre des moyennes. La différence de potentiel au contact était prise entre le fil d'argent soudé comme nous l'avons indiqué à la lame C et le fil d'argent soudé au balai argenté. Elle comportait donc la somme des deux différences de potentiel au contact : celle du balai argenté F, qui ne variait pas, et celle du frotteur B, portant la lame en essai, qui variait suivant le corps expérimenté. Il suffisait de retrancher des lectures au galvanomètre la valeur de la différence de potentiel au contact du balai F, déterminée avec soin, une fois pour toutes, pour obtenir directement la différence de potentiel au contact de la lame expérimentée.

Nous avons constaté, au cours de ces essais, deux valeurs de la différence de potentiel au contact, suivant qu'on la prenait immédiatement après que le contact venait d'être établi, ou bien une ou deux minutes après.

L'aiguille du galvanomètre, après une déviation maxima au moment du contact, rétrogradait peu à peu jusqu'à une déviation minima qu'elle atteignait après une minute et demie ou deux minutes, suivant l'intensité du courant. L'impossibilité où nous étions, à cause de la période assez lente du galvanomètre (environ quatre secondes) de prendre avec suffisamment d'exactitude la valeur maxima, nous a conduits à ne relever que les valeurs minima généralement inférieures de près de 30/100 aux premières. (Fe et Zn 10/100.)

Voici les résultats obtenus pour quelques valeurs d'intensité avec différents métaux et deux échantillons de balais charbon de la Société *Le Carbone*, tous ces corps servant d'anode :

	COURANT en ampères	D. D. P. c. en volts.	RÉSISTANCE de contact en milli Ω	RÉSISTANCE spécifique par centimètres en milli Ω
	I	e	$r = \frac{e}{I}$	
Ag. . . .	10	0 080	8	2
Cu. . .	10	0 150	15	3 75
lait	10	0 200	20	5
Fe.	5	0 210	42	12 5
Zn. . . .	5	0 185	37	9 25
Al. . . .	5	0 130	26	6 50
C.	5	0 800	160	40
C.	5	0 910	182	45 5
Ag. . . .	5	0 055	11	2 75
Cu. . . .	5	0 100	20	5
lait	5	0 130	26	6 50
Fe.	2 5	0 140	56	14
Zn. . . .	2 5	0 110	44	11
Al. . . .	2 5	0 090	36	9
C.	2 5	0 720	288	72
C.	2 5	0 790	316	79

Tous ces corps paraissent donc obéir à la loi énoncée par Max KAHN pour les différences de potentiel au contact du charbon *(voir planche I)* : $\varepsilon = a + b_0 I$. Mais tandis que pour le charbon a est grand, dépassant même quelquefois l'unité et b très petit, pour les métaux les constantes a et b_0 se rapprochent beaucoup plus l'une de l'autre.

En somme, on peut dire que pour tous ces corps la différence de potentiel au contact croît moins vite que l'intensité. Mais, pour les métaux, elle suit de beaucoup

plus près les variations de l'intensité que pour le charbon, pour lequel la résistivité du contact diminue énormément pour les grandes densités de courant.

Nous avons trouvé comme valeur de ε pour les métaux ci-dessus en volts :

$$\begin{aligned} Ag.... \quad & \varepsilon = 0{,}03 + 0{,}025\ I \\ Cu.... \quad & \varepsilon = 0{,}05 + 0{,}01\ I \\ Fe.... \quad & \varepsilon = 0{,}07 + 0{,}014\ I \\ Zn.... \quad & \varepsilon = 0{,}03 + 0{,}015\ I \\ Al.... \quad & \varepsilon = 0{,}03 + 0{,}010\ I \end{aligned}$$

tandis que suivant MAX KAHN on peut trouver pour le carbone :

$$C..... \quad \varepsilon = 0{,}89 + 0{,}046\ I$$

Il est à noter que toutes ces valeurs ont été obtenues avec des contacts absolument propres et polis avant chaque essai, les substances expérimentées étant placées au pôle positif; si on fait les essais en les employant comme cathode, les valeurs oscillent aux environs de 0,20 volts pour 10 ampères, ce qui est la différence de potentiel au contact laiton-laiton, sauf pour l'argent, où on obtient 0,15 intermédiaire entre laiton-laiton et argent-laiton 0,08.

Il semble donc bien que le phénomène soit exclusivement anodique; on dirait qu'il se produit un certain transport du métal de l'anode sur la cathode jusqu'à un certain équilibre, qui caractérise la différence de potentiel au contact stable que l'on obtient au bout de deux minutes environ.

Ce qui paraît confirmer cette manière de voir, c'est que

pour Fe et Zn, dont les conductibilités sont inférieures à celles du laiton, la différence de potentiel au contact diminue à peine au bout de deux minutes, alors que pour les autres métaux la variation est très nette et dépasse 30/100 pour l'argent.

Si l'on prend la différence de potentiel, le plateau de l'interrupteur étant en mouvement et le balai B étant à la place du balai argenté, c'est-à-dire la lame en essai frottant sur un disque continu de laiton, on ne constate pas les deux valeurs que l'on observe à l'arrêt à deux minutes d'intervalle, on obtient immédiatement la deuxième valeur, c'est-à-dire la plus faible qui augmente progressivement quoique faiblement avec la vitesse, peut-être d'ailleurs simplement parce qu'aux grandes vitesses le contact est moins bon à cause des trépidations impossibles à éviter entièrement. A partir d'une pression de 50 grammes au balai, c'est-à-dire de 200 grammes par centimètre carré, la valeur de e ne diminue que très peu avec l'augmentation de pression. Durant les essais, le ressort du balai était généralement taré à 75 grammes, ce qui donnait 300 grammes par centimètre carré de pression.

Il eût été intéressant de pouvoir étudier les différences de potentiel au contact de certains métaux précieux comme le platine, l'iridium, le tungstène, le molybdène. Nous n'avons pu malheureusement nous procurer, au moment où nous procédions à ce travail, ces matières en quantité suffisante pour les essais.

Le platine et l'iridium, de par leur prix prohibitif et leur résistivité très élevée, ne peuvent, malgré leurs qualités (point de fusion très haut, inoxydabilité), être employés il est vrai que dans les appareils ne coupant que de faibles intensités. Le tungstène au contraire, à condition d'être utilisé à l'abri de l'oxygène, car il

s'oxyde très facilement à haute température, semble être le métal de choix pour les palettes des interrupteurs à mercure ; sa conductibilité reste suffisante. Son point de fusion est extrêmement élevé et, de plus, n'étant pas mouillé par le mercure, il permet des ruptures notablement plus franches.

Recherches sur les intensités qui peuvent être coupées sans arcs de rupture.

En décrivant notre dispositif *(fig. 5* et schéma *fig. 7)*, nous avons vu que les ruptures se produisaient entre un balai spécial B et les lames de bronze séparant l'un de l'autre, sur le plateau interrupteur, les cylindres isolants. Ces lames de bronze ayant à l'endroit où se produit le contact environ $3^{m}/_{m}$ de largeur et le bloc de matière en essai dans le balai B ayant une surface de frottement de $5 \times 5^{m}/_{m}$, le contact sera donc établi sur $5 + 3 + 5 = 13^{m}/_{m}$ de la circonférence de frottement. Comme les cylindres isolants de fibre ont $12^{m}/_{m}$ de diamètre et qu'il y en a cinquante pour chaque tour de plateau, il y aura 50 contacts de $13^{m}/_{m} = 650^{m}/_{m} + 50$ ruptures de $3^{m}/_{m} = 150^{m}/_{m}$, c'est-à-dire un rapport de 1/4, si l'on compte que pour que les contacts existent il faut un recouvrement d'au moins 1/2 millimètre.

Voici comment étaient effectués les essais pour juger des intensités pouvant être coupées sans arc de rupture :

Le balai B étant bien ajusté de façon à ce que le bloc essayé appuie normalement sur le plateau, on met en route le moteur M *(fig. 7)* et on note le nombre de

tours de l'interrupteur au tachymètre [1]. Puis, comme nous l'avons indiqué, la tension constante choisie étant appliquée avec le coupleur de la batterie d'accumulateurs, on met le curseur de la résistance sans self R au maximum et on abaisse la clef C. On diminue ensuite progressivement la résistance R en surveillant le balai B jusqu'à ce qu'un arc apparaisse sur ce dernier; on augmente alors un peu la résistance jusqu'à la disparition de l'arc et on note l'indication de l'ampèremètre A.

Il serait peut-être un peu difficile de noter exactement le point où les arcs disparaissent (car il persiste toujours de petites étincelles analogues à celles des balais d'une dynamo où la commutation se fait bien) si on n'avait comme critérium que les sensations visuelles ; mais l'ampèremètre donne heureusement une indication beaucoup plus précise et qui ne saurait prêter à erreur. En effet, l'aiguille de l'ampèremètre qui avançait graduellement au fur et à mesure que l'on diminuait la résistance du circuit saute brusquement en avant de plusieurs divisions; c'est le moment de l'apparition de l'arc. Au moment de l'extinction de l'arc, il saute brusquement en arrière du même nombre de divisions; il donne à ce moment exactement la valeur de l'intensité moyenne qui peut passer dans l'appareil sans formation d'arc. On peut, de là, tirer la valeur du courant instantané à la rupture, en tenant compte du rapport de 4 à 1 entre les fermetures et les ruptures, et de ce que, la constante de temps du circuit étant à peu près nulle, l'intensité du courant doit atteindre presque instantanément après la fermeture sa

1. N'est pas indiqué sur la figure schématique, pour ne pas la surcharger, mais se voit bien dans la photographie du dispositif.

valeur maxima; de même elle doit revenir immédiatement à zéro après l'ouverture s'il n'y a pas amorçage d'arc.

La concordance admissible que l'on obtenait avec la mesure de l'intensité à l'arrêt justifiait d'ailleurs suffisamment cette manière de calculer, au moins pour les faibles vitesses, et montrait que dans ces conditions les contacts fonctionnaient d'une façon satisfaisante.

Le désaccord s'accentuait pour des vitesses plus élevées, sans doute par suite de mauvais contacts ; nous n'avons guère pu dépasser dans nos essais, par suite de ces contacts défectueux, la vitesse de 30 m/sec. Mais toutes les valeurs que nous avons calculées l'ont été à 1.000 tours minute de l'interrupteur, soit une vitesse de $13^{m}50$ environ avec 830 interruptions à la seconde, ce qui est pourtant déjà une vitesse et un nombre de ruptures supérieurs à ceux obtenus dans la plupart des interrupteurs mécaniques.

Dans la limite des observations ci-dessus, voici les résultats que nous avons obtenus avec l'argent, le cuivre, le laiton, l'aluminium, le zinc, le fer et le charbon (balai-dynamo).

Nous avons groupé dans le tableau qui suit un certain nombre de valeurs d'intensités qui peuvent être coupées sans arcs, pour donner un aperçu numérique des observations qui ont été faites sur divers corps.

Mais l'allure générale du phénomène ressort d'une façon plus complète de l'examen des courbes de la planche *(fig. 8)* qui sont déduites non seulement des nombres du tableau ci-dessous, mais encore du total des observations qu'il eût été fastidieux d'exposer numériquement.

Tableau des intensités maxima qui peuvent être coupées sans arc de 0 à 200 volts, avec les corps suivants employés comme anode.

E Volts	I Charbon	I Fer	I Zinc	I Aluminium	I Laiton	I Cuivre	I Argent
198	0 04	0 12	0 16	0 20	0 31	0 40	0 52
178	0 05	0 14	0 18	0 24	0 35	0 45	0 59
148	0 07	0 16	0 20	0 25	0 40	0 50	0 68
77	0 15	0 60	0 55	0 70	0 90	1 35	1 60
50*p*	0 50	1	0 90	1 10	1 40	2 20	2 60
37	3	1 35	1 20	1 55	2	3 60	4 70
31	6	1 70	1 45	2	2 75	6 50	8
27	10	2	1 70	2 70	4 50	9 20	12
25	12	2 6	1 80	4 70	8 50	Au-dessus de 12, non mesurable.	Au-dessus de 12, non mesurable.
18	non mesurable.	11	4 20	Au-dessus de 12	Au-dessus de 12		

Si nous examinons les courbes de la planche 8, nous voyons qu'elles ont toutes une allure hyperbolique et que les branches de droite tendent toutes asymptotiquement vers une tension minima au-dessous de laquelle la puissance que l'on peut couper sans arc serait infinie. Nous n'avons malheureusement pas pu étudier ce que deviendraient ces courbes pour de très grandes intensités, notre appareillage ne nous permettant pas de dépasser 12 ampères ; mais leur allure très régulière semble indiquer qu'elles se poursuivent sans inflexion sensible.

Parmi les corps observés, l'argent et le cuivre (l'argent surtout) paraissent être les métaux de choix pour couper les intensités les plus élevées, quelle que soit la tension.

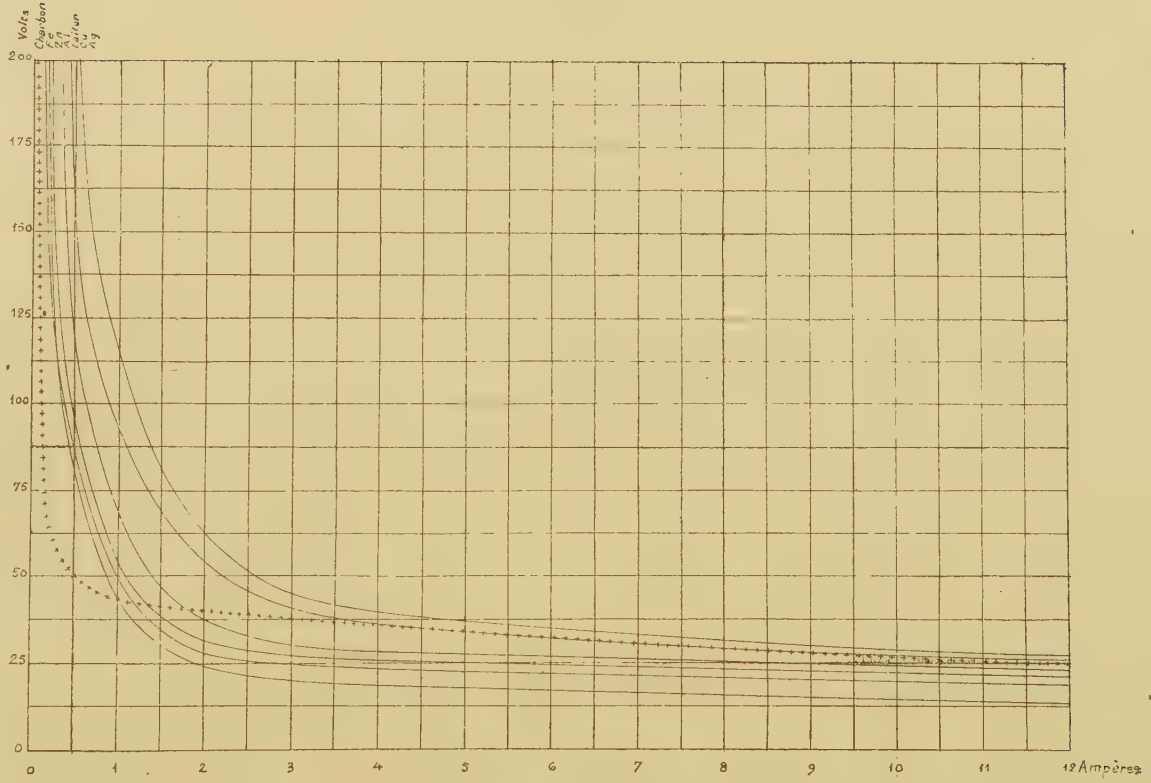

Volts
Charbon
Zn
Fer
Platine
Cu
Ag
200
175
150
125
100
75
50
25
0
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12 Ampères

FIG. 8.

Par contre, avec le charbon qui donne des résultats intéressants au-dessous de 30 volts, un arc se produit toujours dès que la tension dépasse sensiblement cette valeur.

Si nous faisons d'après le tableau précédent le produit EI de l'intensité par la force électromotrice à différents voltages, pour le charbon, le cuivre et l'argent nous aurons l'énergie en watts qui peut être coupée sans arc pour ces trois corps :

CHARBON		CUIVRE		ARGENT	
E Volts	EI Watts	E Volts	EI Watts	E Volts	EI Watts
198	7 92	198	79 2	198	102 96
178	8 90	178	80 1	178	105 02
148	16 36	148	74	148	100 64
77	11 55	77	103 95	77	123 20
50	25	50	110	50	130
37	111	37	133 2	37	173 9
31	186	31	201 5	31	248
27	240	27	248 4	27	324

Donc, au-dessous de 75 watts avec des électrodes en cuivre et de 100 watts avec des électrodes d'argent, nous voyons qu'aucun arc ne peut se produire, tandis que, avec le charbon, un arc s'amorce déjà lorsque l'énergie coupée dépasse 8 watts. Pour les autres corps, nous avons des valeurs intermédiaires. C'est là un phénomène très curieux qui dépend entièrement de la nature des corps mis en présence et de la valeur de la résistance intercalée dans le circuit. Il n'est d'ailleurs pas nécessaire, pour voir le phénomène se produire, que les deux contacts soient constitués du même corps, pourvu que le deuxième corps

employé soit suffisamment conducteur. *Il faut et il suffit, pour donner à la rupture la caractéristique d'un corps déterminé, que ce corps soit placé à l'anode ;* ainsi un contact argent (anode), cuivre ou laiton (catode) se comportera aussi bien qu'un contact argent-argent.

A la vérité, l'aspect général de ces résultats concorde bien avec ce que pouvait faire prévoir la série des mesures de différences de potentiel au contact.

Les résistances spécifiques de contacts de l'argent 2 milli Ω p. c. m. c. et du cuivre 3,75 milli Ω étaient si nettement inférieures à celles des autres métaux que l'on pouvait bien penser voir des arcs s'amorcer plus difficilement avec ces deux corps qu'avec aucun des autres.

Quant aux résultats obtenus avec le charbon, ils pourraient bien provenir de ce fait que la résistance spécifique du contact charbon (ou du moins des agglomérés de carbone qui constituent les balais de charbon) va en diminuant au fur et à mesure que l'intensité augmente. Ce corps obéissant, comme les métaux d'ailleurs, pour les différences de potentiel au contact à la loi $\varepsilon = a + b_0 I$ possède une constante a beaucoup plus grande et b_0 beaucoup plus petite que les métaux, ce qui fait qu'avec de faibles intensités surtout, la différence de potentiel au contact est bien plus élevée qu'avec ces derniers. Peut-être aussi le phénomène est beaucoup plus complexe et dépend également de nombreux facteurs difficiles à différencier. En tout cas, l'étude des circuits sans self ni capacité nous a permis de déterminer pratiquement les conditions optima de rupture sans arc, alors que l'amorçage d'un arc n'est fonction que de la nature des électrodes et naturellement aussi du milieu dans lequel se produit la rupture. Nous avons vu que les métaux les plus conducteurs — argent et cuivre — sont ceux entre

lesquels la différence de potentiel de contact est la plus petite et, par conséquent, les phénomènes thermiques au moment de la séparation des électrodes les plus faibles. Comme il semble bien que les phénomènes d'ionisation qui permettent l'établissement de l'arc dépendent en grande partie des phénomènes thermiques et des phénomènes chimiques qui peuvent s'ensuivre, on comprend que tout ce qui limitera l'élévation de températures diminuera les chances d'amorçage. Ainsi, il est avantageux d'avoir des électrodes assez larges pour permettre le refroidissement par radiation; de même, il convient de faire la rupture à l'abri de l'oxygène pour éviter les oxydations, sources de chaleur ; le gaz d'éclairage et l'hydrogène surtout employés dans ce but comme diélectrique ont donné les meilleurs résultats. Les propriétés réductrices de ce dernier jouent peut-être dans ce cas un rôle assez important et qui n'avait pas été soupçonné tout d'abord. MM. FABRY et BUISSON ont en effet démontré, dans leur travail sur les « arcs entre métaux », qu'un arc ne s'amorçait facilement et ne se maintenait stable entre deux électrodes de fer que si ces dernières étaient oxydées. Dans l'hydrogène, l'arc s'amorce entre deux tiges de fer oxydé, mais s'éteint dès que la perle d'oxyde a été réduite. C'est bien là un signe très net de l'influence favorable que peut avoir l'action réductrice de l'hydrogène, même avec d'autres oxydes que l'oxyde de fer, pour éviter la formation des arcs d'ouverture.

D'ailleurs, le diélectrique gazeux est bien supérieur au diélectrique liquide, ce dernier (alcool, huile, pétrole, eau) se décomposant ou se chargeant peu à peu de particules métalliques.

Rupture des circuits comprenant self et capacité.

Maintenant que nous ne craindrons plus de voir dissimulées par des réactions purement électriques des phénomènes dépendant de la nature intime des électrodes, nous pourrons aborder l'étude de la rupture dans les circuits oscillants. Et nous demanderons aux constantes mêmes des circuits de nous fournir des moyens efficaces pour empêcher l'amorçage d'un arc au moment de l'ouverture, puisque avec une self notable un arc est presque inévitable.

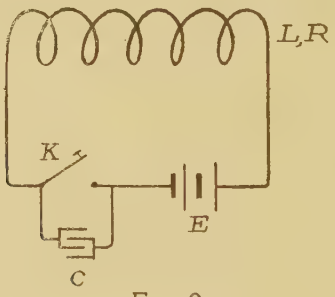


Fig. 9.

Soit *(fig. 9)* un circuit comprenant une source d'électricité de force électromotrice E, un enroulement de self induction L, un interrupteur K shunté par un condensateur de capacité C, la résistance chmique totale étant R. Nous nous trouvons là dans le cas du primaire de la bobine d'induction. Si nous fermons le circuit, le courant s'établit; mais, à cause de la self L, l'intensité n'atteint pas immédiatement la valeur de régime $\frac{E}{R}$. L'établissement

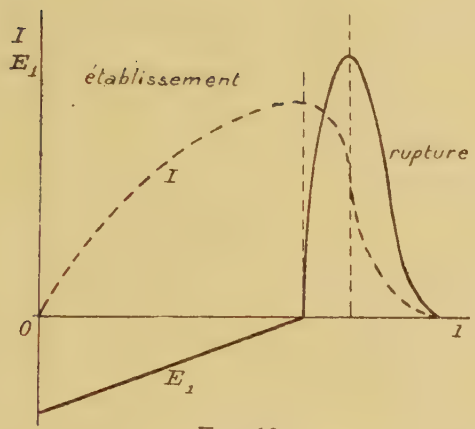


FIG. 10.

du régime exige un temps d'autant plus long que la constante de temps $\frac{L}{R}$ est plus grande. Dans un certain nombre d'appareils électro-médicaux, le condensateur C n'existe pas, la charge s'effectue suivant la courbe de la figure 10, dans laquelle I représente l'intensité et E_1 la force électromotrice; mais en général les choses se passent moins simplement : le condensateur existe pendant la charge. Le condensateur C étant court-circuité n'a aucune action. A l'ouverture, il est automatiquement mis en circuit. Nous nous trouvons donc en présence d'un circuit oscillant. Nous savons que suivant que $R^2 \lesseqgtr 4 \frac{L}{C}$ la charge du condensateur sera continue, apériodique ou oscillante.

Etant donné les grandeurs habituelles de R, L, C dans le primaire d'une bobine d'induction, on a dans ce

cas $R^2 < 4\frac{L}{C}$ et la charge est oscillante suivant la courbe *(fig. 11)*.

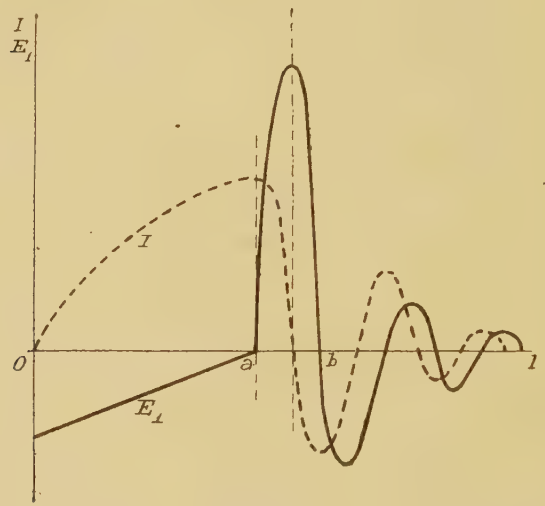


FIG. 11.

La variation du flux est accentuée et plus rapide, et la force électromotrice d'induction est plus grande.

Le condensateur C a donc un double rôle :

1° Il absorbe l'extra-courant de rupture;

2° Il provoque, par sa charge oscillante, une variation de flux plus rapide (si $R^2 < \frac{4L}{C}$).

Plus la capacité C est grande, plus l'étincelle de rupture sera petite ; mais la période de décharge est allongée et la variation du courant moins rapide. Il y a donc intérêt à choisir une valeur moyenne, malgré qu'elle ne satisfasse pas à tous les desiderata.

Quel est le rôle et la provenance de cette étincelle de rupture?

Considérons tout d'abord comment l'énergie se distribue dans le circuit. Tant que l'interrupteur est fermé, l'énergie est fournie par la source du courant; la puissance n'est limitée que par R résistance ohmique du circuit. Une partie de l'énergie fournie se perd en effet Joule, l'autre s'emmagasine dans la self pour être restituée à la rupture; seule cette dernière partie de l'énergie $=$ à $\frac{LI^2}{2}$ nous intéresse, car elle fournira les étincelles. Si nous supposons l'amortissement nul, l'énergie emmagasinée doit rester constante, et à mesure que l'énergie cinétique $\frac{LI^2}{2}$ diminue par suite de la diminution d'intensité qui résulte de l'oscillation, l'énergie emmagasinée dans le condensateur doit augmenter.

On doit toujours avoir :

$$\frac{LI^2}{2} = \frac{C\sigma^2}{2} + \frac{LI^2 t}{2}$$

et lorsque l'intensité I passe par O, toute l'énergie à ce moment est dans le condensateur.

Dès la rupture du courant, la force électromotrice de self-induction σ *(fig. 12)* part de *o*, croît d'abord rapidement, puis passe par un maximum pour $t = \frac{T}{4}$. A la rupture, la distance entre les deux points de contact de l'interrupteur est nulle d'abord; or, nous savons que, pour les très petites distances, le potentiel explosif est propor-

tionnel à la distance; donc, si la vitesse est telle que le potentiel explosif V augmente moins vite que σ, une étincelle doit jaillir à l'interrupteur, allumer un arc et, par suite, empêcher la variation rapide de I. Il faut, dans cette hypothèse, pour éviter l'étincelle de rupture, que la

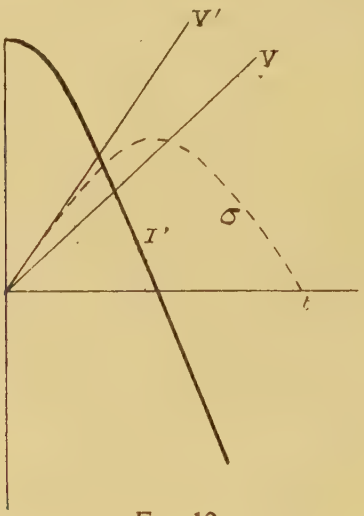


Fig. 12.

vitesse de l'interrupteur dépasse un certain minimum, de façon que la loi des potentiels explosifs V' soit au moins tangente à la courbe σ. Or, l'expérience montre qu'on a beau augmenter la vitesse de l'interrupteur, une étincelle éclate toujours (pour des capacités normales), et le miroir tournant montre que cette étincelle éclate avec un retard sur la rupture géométrique. M. Armagnat, qui a mis ce fait en évidence, s'y appuie pour établir sa théorie; il suppose que la courbe des potentiels explosifs V, au lieu de passer par l'origine, comme dans la figure 12,

passe au-dessus *(fig. 13)*. On voit, dans ce cas, que jusqu'au temps t la force électromotrice σ_1 est inférieure au potentiel explosif V; l'étincelle de rupture éclate seule-

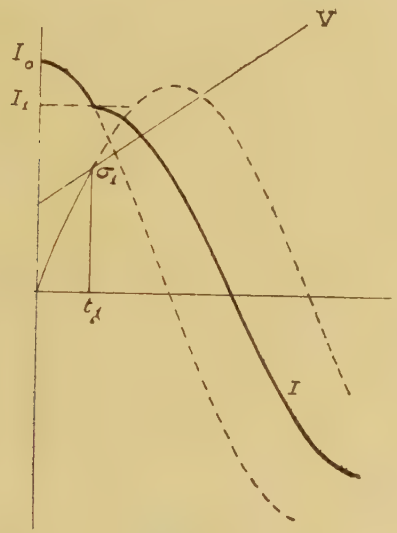


FIG. 13.

ment à cet instant, elle est en retard sur la rupture géométrique du circuit. L'ordonnée de la ligne V peut être considérée comme représentant la résistance à l'étincelle dans le circuit. Pour M. ARMAGNAT, le condensateur se charge donc dans la période extrêmement courte qui sépare la rupture de l'étincelle; à ce moment, il se décharge brusquement; la différence de potentiel devient nulle et nous nous retrouvons en face des conditions initiales au moment de la rupture, c'est-à-dire que la force électromotrice de self-induction devient négligeable par rapport à ce qu'elle était précédemment. On peut donc

dire que le courant I redevient constant pendant un temps infiniment court et qu'il part ensuite de cette valeur I_1 pour commencer une oscillation d'amplitude moindre *(fig. 13)*. La force électromotrice de self-induction, qui était montée jusqu'en σ_1, retombe à 0 pour repartir de nouveau. Si la seconde partie de la courbe σ ne rencontre plus V, il ne se produit plus d'étincelle à l'interrupteur; si σ rencontre de nouveau V, il se produit une nouvelle étincelle et un nouveau point de rebroussement de la courbe I. *Quel que soit le nombre d'étincelles successives, tout se passe comme si l'intensité initiale était celle à laquelle s'est produite la dernière étincelle* I_1.

Par conséquent, l'amortissement des oscillations ne devient régulier qu'à partir de la deuxième demi-oscillation, puisque dans la première se trouve le rebroussement de la courbe. Si on augmente la capacité C, la force électromotrice de self-induction diminuant l'anomalie ci-dessus tend à disparaître, la première demi-oscillation n'a plus une forme différente des suivantes. Ceci expliquerait qu'il y ait une capacité optima. La nature des métaux entre lesquels a lieu l'interruption influe aussi sur le résultat. (Beattie, *Philosophical Magasine*. — J.-E. Ives, *Physical Review*, 1903.)

Dans cette théorie, on néglige complètement le caractère oscillatoire de la décharge du condensateur; or, ce caractère oscillatoire doit exister, puisqu'il y a circuit oscillant constitué par une capacité (le condensateur), une self (celle des conducteurs) et un éclateur (les électrodes mobiles de l'interrupteur); d'ailleurs, tous les tracés oscillographiques dénotent ces oscillations, et M. ARMAGNAT a signalé lui-même *(Eclairage électrique*, 9 avril 1898) la présence d'oscillations à courte période dans les étincelles. Au lieu de négliger ces oscillations dans l'étude

des phénomènes de rupture, si nous en faisons état, il semble que nous pourrions y trouver une explication, par certains côtés nouvelle, du rôle du condensateur de Fizeau, et qu'il serait possible d'améliorer son effet (au moins dans les bobines alimentées à voltage élevé) en modifiant certaines constantes du circuit.

Nous avons vu que l'étincelle était en retard sur la rupture géométrique. Examinons les phénomènes qui se produisent au moment de la rupture géométrique : les deux points de contact sont séparés par une distance infiniment petite, de sorte qu'il existe entre eux une capacité C', d'abord infinie, qui diminue rapidement pour s'annuler très vite. Cette capacité s'ajoute à celle du condensateur et se charge en même temps que ce dernier; or, au moment de son annulation, l'énergie qui s'y était accumulée passe entièrement dans le condensateur C, augmentant d'autant son potentiel. D'autre part, le condensateur C a une charge oscillante, et nous savons que, dans ce cas, la force électromotrice partant de 0 vient osciller autour de la valeur de E (force électromotrice constante appliquée). Le maximum étant atteint après la première demi-oscillation et à peu près égal au double de la force électromotrice appliquée. On comprend très bien que cette valeur, à laquelle commence à venir s'ajouter l'énergie emmagasinée dans la self, soit capable de dépasser le potentiel explosif minimum et qu'une étincelle éclate, amorçant un arc entre les deux contacts de l'interrupteur. Mais sur cet arc nous avons en dérivation la capacité C *(fig. 14)* et la self des conducteurs; il se comportera donc comme un arc Poulsen; un courant oscillatoire à courte période se produira, et lorsque l'amplitude des oscillations sera suffisante, le courant continu auquel elles s'opposeront s'annulera pendant une très faible fraction de

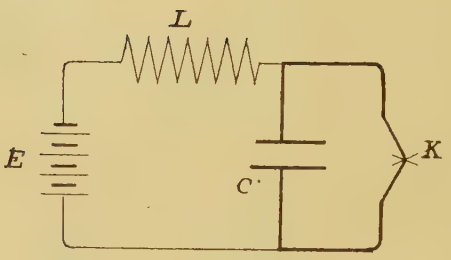


FIG. 14.

seconde, et cela suffira à éteindre l'arc. Alors commencera une autre oscillation de période, beaucoup plus longue que celle de l'onde de haute fréquence, car le condensateur C se trouvera intercalé dans un circuit ayant beaucoup plus d'inductance.

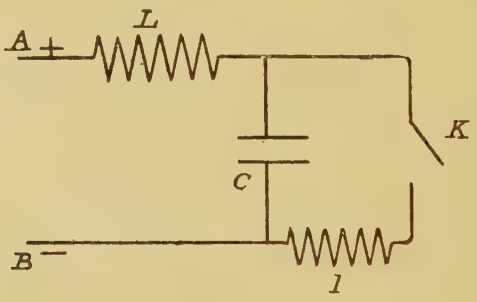


FIG. 14 *bis.*

Si nous admettons cette manière de voir, nous serons amenés, au lieu de faire aussi courtes que possible (comme on s'ingénie à le faire dans les bobines de Ruhmkorff) les branches du shunt de l'interrupteur, contenant le condensateur, à introduire dans ce circuit oscillant une bobine de self sans fer I *(fig. 14 bis)*, de façon à allonger sa

période. Il y a, en effet, avantage à lui donner une longueur d'onde suffisante. Avec des ondes très courtes on a, à résistance égale, un decrément beaucoup plus élevé et par conséquent un amortissement plus rapide, et c'est avec un faible amortissement que les oscillations atteignent le plus facilement l'amplitude nécessaire à l'annulation du courant dans l'arc. Il est d'ailleurs aisé de calculer quelle doit être la longueur d'onde qu'il convient d'employer avec une capacité déterminée. La relation connue entre le courant de charge, la capacité et la tension, dans un circuit oscillant, nous donne : $I \text{ max} = \omega \text{ CV max}$, ω étant la pétiode et V la tension. Par conséquent, $I \text{ max} = \frac{2\pi v}{\lambda} \text{CV max}$. L'amplitude du courant oscillatoire doit être au moins égale au courant continu à couper; or, $I = \frac{E}{R}$. Pour que Vm restât inférieur à E, il faudrait que

$$\frac{2\pi v}{\lambda} C > \frac{1}{R}, \text{ ou bien que } \lambda < 2\pi v CR$$

Pour obtenir une amplitude capable d'annuler le courant continu, il n'y a donc qu'à donner à λ une valeur supérieure ou au moins égale à $2\pi v CR$; un exemple numérique va nous permettre de voir que ces valeurs de λ peuvent être facilement réalisées par le constructeur.

Si nous désirons couper par exemple un courant de 10 ampères sous 110 volts, avec un condensateur de 1/2 microfarad, nous aurons, en réduisant en unités

$$\text{CGS} : \lambda = 2 \times 3{,}14 \times 3 \times 10^{10} \times \frac{0{,}5}{10^{15}} \times \frac{110}{10} \times 10^{9}$$

c'est-à-dire, en chiffres ronds : $\lambda = 10$ kilomètres, ce qui est aisément réalisable, surtout avec les procédés actuels de bobinage de self en galettes.

Le dispositif à employer pourrait être le suivant : A et B *(fig. 14 bis)* les conducteurs d'amenée du courant du secteur, L la self du primaire, C le condensateur, K l'interrupteur et I la bobine de self sans fer pour permettre dans le circuit oscillant CKI des oscillations à haute fréquence d'une longueur d'onde déterminée.

Nous avons vu dans notre étude sur la rupture des circuits sans self ni capacité que c'était avec l'argent et le cuivre que l'on obtenait les ruptures les plus efficaces. Ces données sont évidemment applicables ici et il conviendrait, comme dans les éclateurs Wien ou Lepel, à étincelles étouffées, de donner aux contacts de l'interrupteur une surface assez grande et, si possible, une forme légèrement bombée, car c'est avec cette disposition que l'on obtient en radiotélégraphie les étincelles les plus courtes et les plus résistantes. Il y a une très grande analogie de fonctionnement et les conditions optima sont certainement analogues entre les deux circuits oscillants couplés d'un émetteur Wien et les deux circuits d'une bobine d'induction : plus rapide et plus courte est la variation dans le premier circuit, plus puissante est la réaction dans le second, avec cette différence que le couplage étant beaucoup plus serré dans la bobine d'induction, le secondaire ne peut osciller aussi librement.

Nous avons fait appel à l'énergie électrique oscillante pour éteindre rapidement l'arc de rupture et elle nous a donné, dans le dispositif (14 *bis*), satisfaction. Sans changer beaucoup les constantes du circuit, nous pouvons lui demander plus encore : se substituant à la partie méca-

nique de l'interrupteur, elle peut, à elle seule, assurer les ouvertures et les fermetures.

M. GUILLIET [1], à qui on doit des développements théoriques très intéressants sur cette question, poussant plus loin encore l'analogie avec les circuits oscillants générateurs d'ondes, et s'appuyant sur les travaux de BLONDEL sur l'arc chantant, a pu même présenter à la Société de Physique une bobine d'induction d'un excellent rendement où l'interrupteur était remplacé par un arc électrique. Nous savons, en effet (d'après BLONDEL), qu'un arc électrique alimenté par courant continu à un voltage assez élevé (200 volts au moins) présente, lorsqu'on le shunte par une dérivation contenant self et capacité, deux régimes très différents. (M. BLONDEL en décrit un plus grand nombre, mais ils peuvent se ramener à deux) :

1° Un régime oscillatoire à tension sinusoïdale sans extinction de l'arc ;

2° Un régime discontinu avec extinction et rallumage de l'arc à chaque période. C'est celui qui nous intéresse.

Le deuxième régime se produit lorsque l'arc est court par rapport au voltage employé et qu'il se trouve de fortes self dans le circuit d'alimentation. Il est facilité par l'emploi, dans une atmosphère d'hydrogène, *d'une anode très conductrice de la chaleur (argent)* refroidie par un courant d'eau, ce qui rend les extinctions plus rapides et permet d'augmenter le nombre de périodes.

Le montage de l'arc Blondel ressemble absolument au montage de l'interrupteur tel que nous l'avons préconisé dans la figure 14 *bis*, mais tandis que dans le cas de la

1. GUILLIET : Communication à la Société française de Physique, 3 avril 1914.

figure 14 *bis* nous ne demandions à la capacité C et à la self I que la production d'oscillations capables d'éteindre rapidement l'arc de rupture de l'interrupteur mécanique K, dans l'arc Blondel l'interrupteur mécanique n'existe plus, ce sont les constantes électriques du circuit qui produisent les extinctions successives sans écartement périodique des électrodes, le rallumage étant rendu possible par la haute tension d'alimentation.

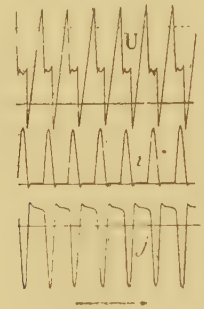


Fig. 15.

Les courbes de la figure 15 nous montrent en (U) la tension aux bornes de l'arc, en *(i)* le courant dans l'arc, en *(j)* le courant dans le condensateur [1].

C'est bien là l'interrupteur idéal, et lorsque la mise au point en sera complète pour ce but particulier, on assistera peut-être à une véritable rénovation de la bobine de Ruhmkorff.

Il semblait que la bobine d'induction, de par son âge déjà ancien et l'usage varié qu'on en avait fait, eût atteint son maximum de perfectionnement et qu'il n'y eût plus

1. A. Blondel : *Sur les phénomènes de l'arc chantant.*

rien de nouveau à en attendre à l'heure actuelle. Ces expériences montrent le contraire. On était limité, quant à la puissance à transformer, à cause des interrupteurs et de leurs imperfections ; avec l'arc oscillant, il n'y a pour ainsi dire plus de limites, puisqu'on utilise couramment dans les radio-communications avec l'Amérique des arcs de 400 kilowatts. On peut reprocher à l'arc d'être d'un maniement délicat et de demander un réglage soigné. On a essayé avec succès, pour y remédier, de remplacer l'arc dans l'hydrogène par un arc au mercure, le rallumage étant produit par une petite étincelle d'induction jaillissant entre une électrode auxiliaire et le mercure de la cathode. Le rôle de l'interrupteur mécanique est alors réduit à la production de cette minuscule étincelle et on peut avoir facilement mille ruptures par seconde.

Quoi qu'il en soit et malgré des tâtonnements inévitables de mise au point, il semble bien que seul l'arc oscillant soit appelé dans l'avenir à faire fonction de « variateur de flux » dans les nouvelles bobines d'induction.

Par sa souplesse, sa puissance, la rapidité et la netteté de ses ruptures, l'absence de complication mécanique, il permettra l'alimentation en courant interrompu à voltage élevé des bobines extra-puissantes que réclame de plus en plus la technique des rayons X.

On s'aperçoit, en effet, que les transformateurs à courants sinuosoïdaux qui avaient supplanté la bobine de Ruhmkorff pour la génération des rayons Rœntgen sont bien moins favorables que cette dernière à la production des rayons durs. Les courtes longueurs d'onde demandent, pour être obtenues, des tensions très élevées, et avec des générateurs à tension sinusoïdale il

faut utiliser pour y arriver des transformateurs très coûteux, à poids de cuivre considérable. Encore le rendement est-il très mauvais, car seul le sommet de la courbe de tension sert à la production des rayons à courte longueur d'onde, tout le reste (soit les trois quarts) donne naissance à des rayons mous inutilisables et dangereux, et à un grand nombre de calories difficiles à dissiper dans les tubes à vide. Avec les bobines d'induction, au contraire, la courbe étant à caractéristique très aiguë, la presque totalité de l'énergie est fournie à très haute tension, communiquant la vitesse maxima à la majorité des électrons émis par la cathode et par conséquent donnant naissance à un faisceau beaucoup plus homogène de rayons X durs.

Comme ces rayons pénétrants sont de plus en plus utilisés soit pour la radiométallographie, où ils sont indispensables, soit pour la radiothérapie, où ils permettent d'atteindre les tumeurs profondes sans léser dangereusement les téguments, soit enfin pour la radiographie instantanée, nous assistons peu à peu à un revirement d'opinion et cette vieille bobine de Ruhmkorff, quelque peu délaissée et considérée même par certains comme un outil suranné, revient en faveur. Elle apparaît comme l'instrument de choix pour l'alimentation des tubes à afflux cathodique, l'expérience ayant démontré [1] que l'émission des rayons X s'y produisait sous la forme de véritables éruptions anodiques coïncidant avec chaque pointe brusque de tension. Pour les tubes Coolidge, qui ne nécessitent pas une stimulation aussi saccadée, l'avantage

1. VILLARD : *Les rayons cathodiques.* — DAUVILLIERS (R. G.E., mars 1917) : *Sur la forme de la décharge électrique dans les Rayons X.*

est moins direct; ils n'en bénéficient pas moins d'un générateur fournissant le maximum de son énergie sous la forme la plus efficace. Le rendement électrique très médiocre de la bobine d'induction reste sans importance devant son rendement très élevé en énergie à haute tension : seul l'interrupteur était le côté faible. Toutes les solutions proposées plus ou moins heureuses présentaient toujours un grave inconvénient : elles ne permettaient pas l'accès aux grandes puissances. La voie nouvelle ouverte par l'arc oscillant semble devoir résoudre aisément toutes les difficultés.

Le groupe arc et bobine donnera sans complication mécanique directement sur courant continu et peut-être sur alternatif les courants interrompus à caractéristique très relevée si favorables à la génération des rayons Rœntgen. Cette forme de courant donne des résultats tellement supérieurs que l'on s'efforce d'améliorer la courbe de tension des transformateurs à redresseurs synchrones en en augmentant la pointe au moyen « d'injecteur » (Beeton et Taylor), sorte de commutateur introduisant périodiquement dans le circuit une inductance, une capacité ou les deux simultanément. Il s'en faut pourtant que la force électromotrice, même après correction, y revête une forme aussi efficace que dans les simples bobines de Ruhmkorff, lorsqu'elles possèdent un interrupteur fonctionnant avec le minimum d'arc de rupture.

CONCLUSION

En résumé, nous avons vu au cours de cette courte étude que si l'on coupe un circuit électrique, les phénomènes qui se produisent sont conditionnés par trois causes principales :

1° La nature et la forme des électrodes à la coupure;

2° Les variations de la résistance de contact entre ces électrodes ;

3° Les constantes électriques du circuit.

Suivant le sens dans lequel agissent ces divers facteurs, la rupture peut être brusque ou traînée; elle se fait dans le premier cas sans arc et est éminemment favorable à l'induction de forces électromotrices élevées dans des dispositifs appropriés. Si un arc se produit, la variation de flux est plus lente et les tensions induites moins élevées.

Pour éliminer cet arc, il faut rechercher tous les facteurs qui peuvent s'opposer à sa formation.

Nous avons démontré, par un examen séparé des circuits sans self ni capacité, que dans la rupture d'un circuit c'était le corps placé à l'anode qui imposait à la rupture sa caractéristique au point du vue de l'amorçage d'un arc.

En établissant la différence de cette caractéristique pour divers corps et pour diverses valeurs de résistance du circuit, nous avons constaté qu'elle varie en sens inverse de la différence de potentiel au contact. Un corps em-

ployé comme anode pourra couper sans arc des intensités d'autant plus grandes, que sa résistance spécifique de contact sera plus faible. Ces résultats acquis permettant le meilleur choix pour le corps devant constituer les électrodes de l'interrupteur, nous sommes passés à l'étude de la rupture dans les circuits oscillants. Nous avons reconnu que le procédé le meilleur, pour désamorcer rapidement un arc, consiste à opposer au courant de l'arc un courant oscillant, dont la valeur soit suffisante pour annuler pendant un temps très court le premier courant; l'arc s'éteint, pour si peu que les conditions extérieures s'y prêtent. Nous avons déterminé quelle devait être la période oscillatoire la plus favorable de ce courant d'opposition pour une intensité et une capacité déterminées.

Enfin, nous appuyant sur les études de BLONDEL et GUILLIET, nous avons admis que l'interrupteur idéal pour la bobine d'induction serait celui qui, sans aucune pièce mobile, n'utiliserait, pour obtenir les ruptures dans le primaire, que les seules variations produites dans un arc libre ou une lampe à mercure, par une capacité et une self-induction placées en dérivation.

En effet, s'il est impossible d'éviter l'arc à l'ouverture d'un circuit oscillant, il est cependant un artifice qui permet de s'affranchir du traînage nocif qu'il produit lorsqu'il s'allume à la rupture. Il suffit d'avancer le moment de son amorçage en le faisant coïncider avec la fermeture du circuit. Le soufflage brusque de cet arc ainsi décalé procurera une coupure franche impossible à obtenir autrement.

On peut envisager divers procédés pour réaliser les allumages et les extinctions successives, mais la solution purement électrique préconisée par M. GUILLIET se classe incontestablement parmi les plus simples et les plus élé-

gantes, en nous amenant à cette conclusion d'apparence un peu paradoxale que le meilleur moyen pour obtenir une rupture sans arc des circuits oscillants est justement de produire la rupture de ces circuits par un arc oscillant.

Imprimerie de l'*Économiste Méridional*, 9, Boulevard du Jeu-de-Paume, Montpellier.